

**А.І. ЩЕРБА**, канд. фіз.-мат. наук, ЧДТУ, Черкаси;  
**Г.В. КАНАШЕВИЧ**, д-р техн. наук, проф., ЧДТУ, Черкаси;  
**І.В. ДРОБОТ**, ст. викл., ЧДТУ, Черкаси

## **АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ МІКРООБРОБЦІ**

Побудована математична модель задачі теплопровідності для оптичного матеріалу і рухомого електронного потоку на етапах нагріву та електронно-променевої мікрообробки (ЕПМ) та представлена нова постановка задачі теплопровідності з врахуванням леткості матеріалу розплаву ЕПМ. Розроблений алгоритм керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів ЕПМ.

Построена математическая модель задачи теплопроводности для оптического материала и подвижного электронного потока на этапах нагрева и электронно-лучевой микрообработки (ЭЛМ), представлена новая постановка задачи теплопроводности с учетом летучести материала расплава ЭЛМ. Разработан алгоритм управления качеством поверхностного слоя оптических материалов ЭЛМ.

Is built the mathematical model of heat conduction task for an optical material and the electron stream moving at the stages of heating and electron-radial stream micromachining (ESM) and presented a new formulation of the heat conduction task, taking into account a volatility of fusion material of ESM. An algorithm is made for ruling of the quality of the surface layer of optical materials ESM.

**Вступ.** Проблема керування якістю поверхневого шару (ПШ) оптичних матеріалів при виготовленні елементів нового покоління для інтегральної оптики і мікрооптики, з високим ступенем інтеграції (200...700 ел/мм<sup>2</sup> тощо) [1 - 8], на поверхні плати є головною в сучасній техніці і технології обробки. Одним із засобів вирішення цієї проблеми є розробка і застосування новітніх методів мікрообробки та прецизійного високопродуктивного, екологічно чистого інструментарію і технологій, спрямованих на надання ПШ оптичних матеріалів таких властивостей і характеристик, які на теперішній час традиційними методами отримати неможливо. Яскравим прикладом такого інструменту і методу обробки є електронний потік стрічкової форми [9 - 15] та електронно-променева мікрообробка (ЕПМ) плоских поверхонь у вакуумі [7, 12 - 15].

Проте, якість виробів практично неможливо забезпечити без розробки відповідного алгоритму ЕПМ, багатоетапного моделювання та гнучкого керування процесом з використанням сучасної комп'ютерної техніки. Алгоритм та моделювання ЕПМ дозволяють не тільки скоротити обсяг експериментальних досліджень, а й суттєво знизити витрати на проведення натурних випробувань та візуалізувати сам процес мікрообробки тощо.

Таким чином, метою даної роботи є розробка алгоритму керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при ЕПМ.

**Обладнання і матеріали. Об'єкт обробки.** Паралельні пластини з оптичного скла К8, К108, К208, БК10, ТК21 у формі дисків (діаметр 20,0 мм, товщина 2; 4; 6; 8 мм) та у формі прямокутників з лінійними розмірами  $70 \times 14 \times 6$  мм, з відполірованими поверхнями  $R_z = 0,025$  мкм.

**Інструмент обробки.** Електронно-променева гармата Пірса, що розташована у вакуумній установці УВН74-ПЗ і генерує стрічковий електронний потік питомої потужності  $10^1 \text{ Вт/см}^2 \leq P_{\text{пот}} \leq 10^5 \text{ Вт/см}^2$ , який може переміщуватися по поверхні виробу зі швидкістю  $v_{\text{ном}} = 0 \dots 20 \text{ см/с}$ ,  $b'$  – ширина стрічки 0,5...3 мм.

Поверхня пластини оплавляється електронним потоком на глибину до 160 мкм (рис. 1 а), а охолодження є кінцевою стадією формування модифікованого ПШ (рис. 1 б). Сформований ПШ відрізняється від основного матеріалу структурою, хімічним складом, оптичними властивостями, мікрогеометрією.

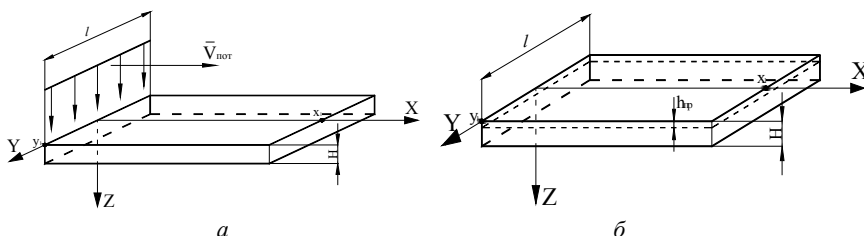


Рисунок 1 – Схема дії стрічкового електронного потоку на плоско-паралельну пластину (а) та розташування модифікованого ПШ (б).

За критерії якості ПШ при мікрообробці вибрані:

- середньостатистичний нанорельєф  $RZ$  поверхні;
- середньостатистична глибина  $h_{np}$  модифікованого ПШ;
- оптична однорідність ПШ (бездефектність, залишкові термонапруження);
- площинність  $N$ ,  $\Delta N$  поверхні пластин;
- залишковий рівень вихідної поверхні  $\Delta h$ .

При цьому, якість мікрообробки визначається станом технологічного середовища, досконалістю інструмента обробки – електронного потоку та точністю і гнучкістю керування процесом.

**Постановка задачі та алгоритм ЕПМ.** Для моделювання і візуалізації процесу ЕПМ оптичних матеріалів розроблений програмний комплекс, в основу якого покладено математичну модель, що включає рівняння задачі теплопровідності для оптичних матеріалів, та алгоритм ЕПМ.

У табл. 1 наведена загальновідома постановка задач теплопровідності для оптичного матеріалу і рухомого електронного потоку на етапах нагріву

та електронно-променевої мікрообробки у вигляді рівнянь, а на рис. 3 а-г схематично представлені відповідні теплові схеми, які використовуються при ЕПМ.

У табл. 2 представлена нова постановка задачі теплопровідності на етапі ЕПМ з врахуванням леткості матеріалу розплаву, що дозволило зменшити похибку розрахунку до 5...7%. Відповідна теплова схема для нової постановки задачі ЕПМ представлена на рис. 3 д.

Таблиця 1

Загальновідома постановка задач теплопровідності для оптичного матеріалу і рухомого електронного потоку на етапах нагріву та ЕПМ.

Етап термічного циклу	Диференційне рівняння теплопровідності	Крайові умови	Теплова схема [Посилання]
Попередній нагрів (радіаційний)	$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$	$T _{t=0} = T_0, T \rightarrow T_0 \text{ при } z \rightarrow +\infty;$ $-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big _{z=0} = \varepsilon_S \cdot \sigma \cdot (T_S^4 - T_C^4)$ $\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow +\infty$	Рис. 3 а [9]
Нагрів поверхні матеріалу рухомих електронним потоком	$C_V \frac{\partial T}{\partial t} =$ $= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) +$ $+ C_V \cdot V_{nom} \frac{\partial T}{\partial x}$	$T _{t=0} = T_1, T \rightarrow T_1, \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \rightarrow 0$ при $x, y \rightarrow \pm\infty; t \rightarrow +\infty$	Рис. 3 б [2-4]
Завершальне відповідальне охолодження (радіаційне)	$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$	$T _{t=0} = \phi(z), T \rightarrow T_0 \text{ при } z \rightarrow +\infty;$ $-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big _{z=0} = \varepsilon_S \cdot \sigma \cdot (T_C^4 - T_S^4)$ $\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow +\infty$	Рис. 3 в [8]
Завершальне інерційне охолодження		$T _{t=0} = T_4, T \rightarrow T_0 \text{ при } z \rightarrow +\infty$ $\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow +\infty$	Рис. 3 г [9]

Нова постановка задачі теплопровідності на етапі електронно-променевої мікрообробки з врахуванням леткості матеріалу розплаву.

Етап термічного циклу	Диференційне рівняння теплопровідності	Крайові умови
Нагрів і випаровування з поверхні матеріалу в результаті дії електронного потоку	$C_V \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + C_V \cdot V_{nom} \frac{\partial T}{\partial x}$	$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big _{z=0} = F_n(x_0 - V_{nom} \cdot t, y, 0, t) - L_n(x, y, 0, t, T_{z=0})$ $\frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=x_0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=x_1} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big _{z=z_1} = 0,$ $\frac{\partial T}{\partial y} \Big _{y=y_0} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big _{y=y_1} = 0, \quad T \Big _{t=0} = T_0$ <p>при <math>t \rightarrow +\infty</math>; <math>x_0 \leq x \leq x_1</math>; <math>y_0 \leq y \leq y_1</math>; <math>0 \leq z \leq z_1</math></p>

Оцінка глибини проплавлення оптичної поверхні проводиться за теплофізичними характеристиками матеріалу, параметрами електронного потоку та рівнем зниження поверхні.

При попередньому нагріві ПШ підвищує свою чутливість до електронного потоку, що виражається у підвищенні електропровідності матеріалу, а низька теплопровідність матеріалу дозволяє накопичувати тепло у ПШ на певну глибину. Енергетика потоку щодо поверхні матеріалу змінюється за *гаусовим законом*. В розробленій математичній моделі суттєвим є умовний поділ електронної стрічки на три основних складових: фронт, вершину та хвіст потоку (рис. 2).

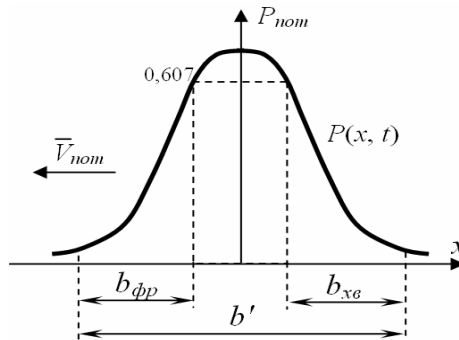


Рисунок 2 – Схема умовного розподілу потужності стрічкового електронного потоку за перерізом:  $b_{фр}$  – фронт потоку;

$b_{хв}$  – хвіст потоку,  $V_{nom}$  – швидкість потоку,  $b'$  – ширина стрічки.

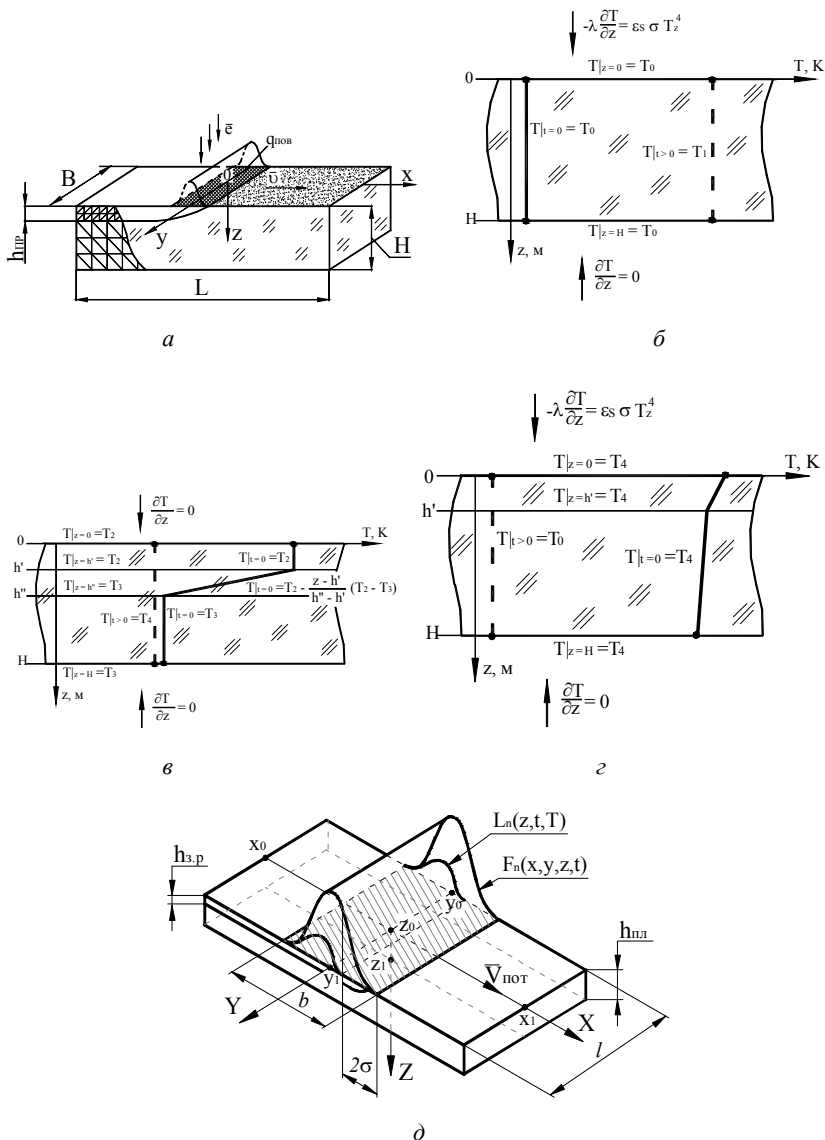


Рисунок 3 – Теплові схеми, які використовуються при ЕПМ:  
 а – попередній нагрів (радіаційний); б – нагрів поверхні матеріалу рухомих електронним потоком; в – завершальне відповідальне охолодження (радіаційне);  
 г – завершальне інерційне охолодження;  
 д – модель, яка використовується з врахуванням леткості матеріалу розплаву.

Зауважимо, що саме такий підхід до вивчення взаємодії електронного потоку з ПШ запропонований вперше. В розробленій моделі враховано вплив кожної складової потоку, що надало можливість здійснити більш керований процес енергетичного впливу потоку шляхом зміни коефіцієнта зосередженості потоку  $k_e$ .

Вважаємо, що вся енергія електронного потоку розподіляється на нагрів, плавлення та випаровування (леткість) матеріалу ПШ на глибину  $h_{np}$ . У даному випадку, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q_{пот} = Q'_{нагр} + Q''_{нагр.плавл} + Q'''_{нагр.вип},$$

де  $Q'_{нагр}$  – нагрів до температури 570...850°C, що відповідає твердому і пластичному стану скла з відповідною в'язкістю  $\lg \eta_{570} \approx 11 \text{ Пас} \cdot \text{с}$  та  $\lg \eta_{850} \approx 4 \text{ Пас} \cdot \text{с}$ ;

$Q''_{нагр.плавл}$  – нагрів до температур 850...1250°C, що відповідає пластичному стану скла  $\lg \eta_{850} \approx 4 \text{ Пас} \cdot \text{с}$  та його рідинному стану  $\lg \eta_{1250} \approx 1 \text{ Пас} \cdot \text{с}$ ;

$Q'''_{нагр.вип}$  – нагрів до температур 850...1250°C, що відповідає інтенсивній леткості матеріалу розплаву і зниженню рівня вихідної поверхні на  $h_{зниж}$ .

При цьому:

$$Q_{пот} = P_{пот} \cdot t = P_{пот} \cdot l \cdot b_{пот} = P_{пот} \cdot l_{пот} \cdot b_{пот}^2 / V_{пот} = P_{пот} \cdot b_{пот} / V_{пот};$$

$$b_{пот} = b_{\max} + 2b_{фр};$$

$$Q'_{нагр} = V_{пот} \cdot b_{фр} \cdot h_{np} \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot (850 - 570) \cdot t;$$

$$Q''_{нагр.плавл} = V_{пот} \cdot b_{\max} \cdot h_{np} \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot (1250 - 850) \cdot t;$$

$$Q'''_{нагр.вип} = V_{пот} \cdot b_{лет} \cdot h_{зниж} \cdot m_3 \cdot \rho_3 \cdot c_3 \cdot (1250 - 850) \cdot t,$$

де  $b_{лет} = b_{\max}$ ;  $b_{np} = b_{\max}$ ;  $m_3$  – кількість випарованого матеріалу відносно маси розплаву.

Знаходимо взаємозв'язок:

$$P_{пот} = \frac{h_{np} \cdot t \cdot V_{пот}^2 \cdot b_{\max}}{b_{пот}} \cdot \left( \rho_1 \cdot c_1 \cdot \Delta T_1 + \rho_2 \cdot c_2 \cdot \Delta T_2 + \frac{\rho_3 \cdot c_3 \cdot \Delta T_3 \cdot h_{зниж}}{h_{np}} \right).$$

Таким чином, рівняння дозволяє оцінити глибину проплавлення  $h_{np}$  за відомими режимами впливу електронного потоку на матеріал: теплофізичними характеристиками матеріалу,  $k_e$  – коефіцієнтом зосередженості, залишковим рівнем вихідної поверхні.

**Алгоритм задачі ЕПМ.** Схему алгоритму керування якістю ПШ оптичних матеріалів при електронно-променевій мікрообробці представлено на рис. 4.

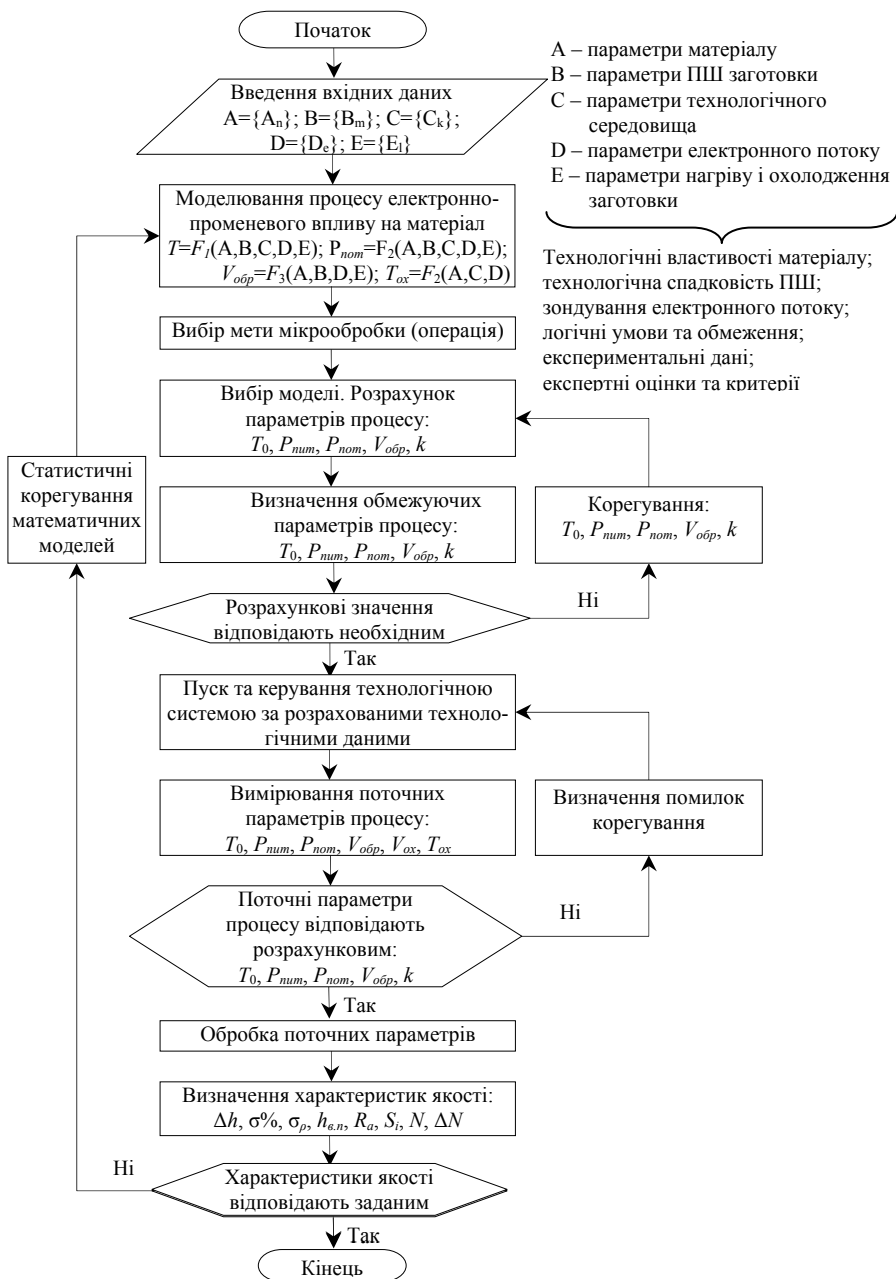


Рисунок 4 – Схема алгоритму керування якістю ППШ електронно-променевою мікрообробкою.

При цьому вибір стану та характеристик ПШ уточнюється технологічними режимами обробки, а саме:

- визначення міцності ПШ до основного матеріалу проводиться через співвідношення  $h_{пер} \approx h_{пр}$ , яке відповідає високій надійності ПШ при експлуатації ( $h_{пер}$ ,  $h_{пр}$  – товщина відповідно перехідного та проплавленого шару);
- визначення рівня зниження поверхні від термічного впливу електронного потоку проводиться через розрахунок кількості випаруваної речовини за ступенем леткості компонентів ПШ;

- визначення очікуваної товщини  $h_{пер}$  проводиться з урахуванням швидкості охолодження структури ПШ;

- визначення рівня зниження поверхні від термічного впливу електронного потоку проводиться через розрахунок кількості випаруваної речовини за ступенем леткості компонентів ПШ;

- одержання елементів мікрооптики з необхідними розмірами та ступенем інтеграції обумовлюється технічним рівнем фотолітографії;

- порівняння одержаних якісних показників з існуючими стандартами.

**Моделювання ЕПМ.** На першому етапі комп'ютерного моделювання ЕПМ використовувався ліцензійний пакет MathCad, за допомогою якого була проведена серія обчислювальних експериментів для виявлення впливу певних параметрів на процес ЕПМ, а також проводилося варіювання технологічними параметрами ЕПМ в межах, що реалізуються на виробництві.

Наступний етап комп'ютерного моделювання ЕПМ виконувався за допомогою розробленого спеціалізованого програмного комплексу (СПК), програмний код якого багато разів тестувався на адекватність експериментальним даним технологічного процесу ЕПМ. Засобом розробки СПК було середовище програмування Delphi 7.0.

Адекватність результатів, отриманих за допомогою розробленого програмного комплексу, встановлювалася шляхом порівняння з результатами, отриманими в MathCad, та експериментальними даними ЕПМ.

**Перспективи подальших досліджень.** Розроблений алгоритм керування якістю поверхневого шару може використовуватися при розробці інноваційних технологій створення елементної бази мікрооптики та інтегральної оптики. Галузі застосування: оптична промисловість, волоконно-оптичні лінії зв'язку, приладобудування, медична техніка.

**Висновки.** Таким чином, розроблений алгоритм керування якістю ПШ при ЕПМ забезпечив наступне.

1. Реалізацію стабільного фізико-технічного процесу електронно-променевої мікрообробки. Досягнуто підвищення якості виробів шляхом оперативного керування і діагностики параметрів обробки, реалізовано весь



необхідний температурний профіль обробки виробу залежно від його теплофізичних характеристик, форми і габаритів, швидкості й напрямку подачі виробу під електронний потік, необхідні технологічні параметри електронного потоку. Даний алгоритм поширюється на інші матеріали спеціального призначення (технічне скло, кварцове скло, оптичну кераміку).

2. Підвищення гнучкості та швидкості переходу від матеріалу до матеріалу при мікрообробці, коли параметрами керування якістю ПШ є температура попереднього нагріву матеріалу  $T_0$ , повна та питома потужність потоку  $P_{\text{пот}}$ ,  $P_{\text{пит}}$ , швидкість обробки  $V_{\text{пот}}$ , час  $t_{\text{ох}}$ , швидкість охолодження  $V_{\text{ох}}$ , температурний вплив переднього фронту потоку та його високоінтенсивної частини.

**Список літератури:** 1. Хаус Х. Волны и поля в оптоэлектронике: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 432 с. 2. Интегральная оптика. Под ред. Т. Тамира. – М.: Наука, 1978. – 344 с. 3. Гончаренко А. М., Радько В. П. Введение в интегральную оптику. – Минск: Наука и техника, 1975. – 148 с. 4. Дудко Г. В., Лисоченко В. Н. Проблема формирования особочистых и бездефектных поверхностей // Материалы краткосрочного семинара. – Ленинград. – 1985. – С. 13-16. 5. Пат. 67516А Україна, МКИ С03С15/00. Спосіб виявлення дефектного приповерхневого шару оптичного скла / Дубровська Г. М., Канашиевич Г. В., Бондаренко М.О.; Заявл. 09.10.2003; Опубл. 15.06.2004; Бюл. № 6. 6. Яцевич Н. Н., Шевлик Н. В. Способ изготовления линзовых растров: А.С. 1147699 СССР; Опубл. 30.03.85; Бюл. № 12. 7. Котельников Д. И., Канашиевич Г. В., Дубровская Г. Н. Способ изготовления канальных оптических волноводов: А.С. 1798995 СССР // Б.И. 1991. № 12. 8. Дудко Г.В., Лисоченко В. Н. Проблема формирования особочистых и бездефектных поверхностей // Материалы краткосрочного семинара. – Ленинград. – 1985. – С. 13-16. 9. Ващенко В. А., Канашиевич Г. В., Краснов Д. М., Дмитренко П. П. Математическое моделирование и расчет глубины оплавления оптических материалов подвижным электронным лучом // Вісник ЧІТІ. – № 1. – 2000. 10. Ващенко В. А., Дробот І. В., Канашиевич Г. В. Методика использования математического расчета теплового воздействия электронного луча на оптические материалы // Збірник наукових праць. Інститут проблем моделювання в енергетиці. НАН України. Випуск 11. – Київ: 2001. 11. Ващенко В. А., Дробот І. В., Канашиевич Г. В. Розподіл заданого розподілення теплової дії за допомогою системи стрічкових електронних променів // Радиоэлектроника и информатика. – 2002, № 2 (19). – С. 48-51. 12. Канашиевич Г. В., Котельников Д. И. Электронная обработка оптических материалов // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 2. – С. 12-16. 13. Ващенко В. А., Дубровская Г. Н., Поздеев С. В., Канашиевич Г. В. Оптические свойства подложек ОИС из стекла после низкоэнергетической электронно-лучевой обработки // Труды третьего международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование», т. 1, Харьков, 1999. 14. Канашиевич Г. В. Формирование функциональных слоев и микроэлементов в поверхности стекла электронным потоком // Сборник докладов 5-ой Международной научно-технической конференции «ОТТОМ-5», г. Харьков, 27 сентября – 1 октября, 2004 г. 15. Бондаренко М. О. Підвищення ефективності електронної технології та обладнання для фінішної обробки оптичних пластин під виробу мікрооптики: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.07. [Електронний ресурс]/ М.О. Бондаренко; НТУУ "КПІ". – К., 2006. – 20 с. – укр. 16. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

Надійшла до редколегії 01.04.2012